ESTIMATION OF RADIAL VELOCITY OF OBJECTS USING FRACTIONAL DIFFERENTIATION OF DOPPLER RADAR SIGNAL

Zakharchenko V.D., Kovalenko I.G.
Physics and Technics institution of Volgograd State University
32, Bogdanova Str., Volgograd, 400062, Russian Federation
Ph.: (8442) 460811, e-mail: Zakharchenko_VD@mail.ru

Abstract — The method for estimation of radial velocity of fast-moving near-Earth objects (asteroids, meteorites) from a Doppler signal, based on calculation of a fractional derivative of order 1/2. Theoretical basis for using fractional differentiation for fast estimation of mean Doppler spectrum frequency in the temporal area without spectral analysis is given. We describe the algorithm structure for real-time estimation; estimation of velocity resolution are performed using the proposed method in X-band. It is shown that the number of operations can be significantly reduced in comparison with similar value under spectral processing.

ОЦЕНКА РАДИАЛЬНОЙ СКОРОСТИ ОБЪЕКТОВ МЕТОДОМ ДРОБНОГО ДИФФЕРЕНЦИРОВАНИЯ ДОПЛЕРОВСКОГО СИГНАЛА РЛС

Захарченко В. Д., Коваленко И. Г.
Физико-технический институт Волгоградского государственного университета
ул. Богданова, 32, Волгоград, 400062, Россия
тел.: (8442) 460811, e-mail: Zakharchenko_VD@mail.ru

Аннотация — Предложена методика оценки радиальной скорости быстродвижущихся околоземных объектов (астероидов, метеоритов) по доплеровскому сигналу, основанная на вычислении дробной производной сигнала порядка 1/2 . Приводится теоретическое обоснование использования дробного дифференцирования для быстрой оценки средней частоты доплеровского спектра во временной области без спектрального анализа. Представлена структура алгоритма оценки в реальном масштабе времени; приведены оценки разрешения по скорости с использованием предложенной методики в X-диапазоне. Показано, что число операций может быть значительно снижено по сравнению с аналогичной величиной при спектральной обработке.

I. Введение

Защита от астероидно-космической угрозы предполагает обнаружение опасных космических объектов, измерение параметров их движения, расчет траектории и их уничтожение, либо, по крайне мере, оперативное оповещение об опасности национальных служб по защите населения от чрезвычайных ситуаций на территории, подвергаемой угрозе.

При определении координат космического объекта необходим быстрый и точный прогноз его траектории. Такой прогноз производится по измерению скорости объекта на основе анализа доплеровского сдвига частоты отраженного радиолокационного сигнала. Повышение точности и оперативности измерения частоты доплеровского сигнала является необходимым условием эффективной работы радиолокационных систем космической защиты.

В случае, когда различные точки объекта, формирующие отраженный сигнал, движутся с различными скоростями (например, при вращении объекта) отраженный сигнал может иметь широкий спектр доплеровских частот, соответствующий спектру скоростей отражающих точек на его поверхности. В этом случае в качестве доплеровской частоты в радиолокации используется центр тяжести энергетического спектра доплеровского сигнала, который остается устойчивой характеристикой, соответствующей движению центра масс движущегося объекта.

В настоящей работе предлагается использовать алгоритм оценки радиальной скорости космического тела в течение времени прихода доплеровского сигнала, позволяющий наиболее экономно использовать временные и вычислительные ресурсы системы космической защиты при прогнозе траектории объекта.

II. Оценка средней частоты спектра доплеровского сигнала

Определение центра тяжести спектра (средней частоты) ω_0 предполагает расчет энергетического спектра — спектральную обработку сигнала $x(t)$, которая требует большого объема оперативной памяти и, главное, значительного времени обработки, что по тактическим соображениям в рассматриваемой задаче неприемлемо.

В теории сигналов для оценки частотных параметров спектра широко используется метод моментов [1, 2], в соответствии с которым средняя частота спектра сигнала $x(t)$ на положительной полуоси частот определяется как центр тяжести ω_0 его энергетического спектра $E(\omega)$:

$$\omega_0 = \frac{\int_0^\infty \omega E(\omega) d\omega}{\int_0^\infty E(\omega) d\omega}, \qquad (1)$$

где $E(\omega) = \left|\dot{S}(\omega)\right|^2$, $\dot{S}(\omega) = \mathrm{F}[x(t)]$ — спектральная плотность амплитуды сигнала, ограниченного интервалом наблюдения $[0, T]$.

Однако для оценки параметров спектра отраженного сигнала необходимо использование спектрального анализа, что не всегда отвечает оперативным задачам, поскольку получение спектра и его характеристик с использованием средств вычислительной техники необходимо вести после того, как сигнал уже получен, т.е. за пределами интервала наблюдения $[0, T]$.

2013 23rd Int. Crimean Conference "Microwave & Telecommunication Technology" (CriMiCo'2013). 9—13 September, Sevastopol, Crimea, Ukraine
 ISBN: 978-966-335-395-1. IEEE Catalog Number: CFP13788

Измерение частоты в реальном масштабе времени не вызывает трудностей в случае монохроматического сигнала: достаточно подсчитать число положительных переходов сигнала через нулевой уровень за единицу времени (квазичастота); для этой цели используются алгоритмы, работающие по принципу усредняющего счета. Проблема возникает, когда спектр исследуемого сигнала расширяется, что характерно в случае наличия различных скоростей отражающей поверхности при вращении. В этом случае оценка скорости по значению квазичастоты не совпадает истинной (1), причем ошибка тем больше, чем шире спектр доплеровского сигнала.

Получение быстрой оценки средней частоты спектра требует максимальной скорости проведения вычислений в темпе поступления отсчетов сигнала. Расчет энергетического спектра $E(\omega)$ и его моментов аппаратно-программным методом с использованием алгоритмов дискретного преобразования Фурье (в том числе БПФ) непосредственно по соотношению (1) налагает высокие требования к скорости и объему вычислений при реализации обработки в частотной области, поскольку для получения спектральных оценок необходимо значительное время обработки по истечении интервала наблюдения.

Целью предлагаемого подхода является повышение скорости получения оценки средней частоты спектра доплеровских сигналов путем вычисления во временной области <u>по мере поступления сигнала без спектральной обработки</u>. Решение этой задачи предполагает нетрадиционный вид обработки - вычисление дробной производной сигнала по мере его поступления. Алгоритм дробного дифференцирования сводится к реализации цифрового фильтра со специальной характеристикой и принципиальных затрудений не вызывает.

Вычисление квадрата нормы $S(\omega)$ в знаменателе (1) можно проводить во временной области по мере поступления сигнала, преобразуя соответствующие интегралы по равенству Парсеваля [2]:

$$\int_0^\infty |S(\omega)|^2 d\omega = \frac{1}{2}\|S(\omega)\|^2 = \pi\int_0^T x^2(t)dt \cdot \qquad (2)$$

Аналогичным образом можно вычислить и числитель выражения (1), что приводит к необходимости дробного дифференцирования сигнала:

$$\int_0^\infty \omega|S(\omega)|^2 d\omega = \frac{1}{2}\left\|\sqrt{j\omega}S(\omega)\right\|^2 = \pi\int_0^T \left|D^{1/2}x(t)\right|^2 dt, \qquad (3)$$

где $D^{1/2}x(t) = \mathbf{F}^{-1}\left\{\sqrt{j\omega}\,\mathbf{F}[x(t)]\right\}$ — оператор дробной производной порядка 1/2, определяемый как свертка входного сигнала с импульсной характеристикой фильтра $h(t) = \mathbf{F}^{-1}\left\{\sqrt{j\omega}\right\}$. В результате выражение (1) можно представить в виде

$$\omega_0 = \frac{\int_0^T \left|D^{1/2}x(t)\right|^2 dt}{\int_0^T x(t)^2 dt}. \qquad (4)$$

Соотношение (4) показывает, что оценка центра тяжести спектра (1) может формироваться <u>без спектральной обработки</u> по мере прихода отраженного целью сигнала и быть получена к концу интервала наблюдения T. На рис. 1 представлена структура алгоритма «быстрой» оценки центра тяжести спектра сигнала $x(t)$ в реальном масштабе времени.

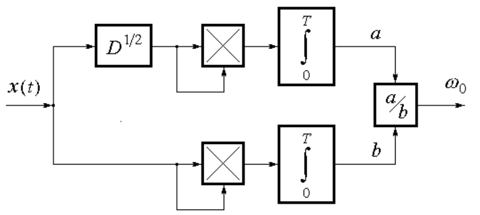

Рис. 1. Структура измерителя средней частоты.

Fig. 1. The structure of a mean frequency meter

В работе [3] показано, что оператор дробного дифференцирования Римана-Лиувилля [4]:

$$D^{1/2}x(t) = \frac{1}{\sqrt{\pi}}\frac{d}{dt}\int_0^t \frac{x(t')dt'}{\sqrt{t-t'}} \qquad (5)$$

может быть представлен как линейный фильтр с импульсной характеристикой:

$$h(t) = \lim_{\varepsilon\to 0}\frac{1}{\sqrt{\pi}}\left[\frac{\delta(t)}{\sqrt{t+\varepsilon}} - \frac{\sigma(t)}{2(t+\varepsilon)^{3/2}}\right], \qquad (6)$$

где $\delta(t)$ — дельта-функция Дирака; $\sigma(t)$ — функция включения Хевисайда.

Поскольку значения $h(t)$ на больших временах влияют на низкочастотную область сигналов, ее длительность можно ограничить величиной $T_m >> 1/\omega_0$, сравнительно небольшой при космических скоростях объектов. Величина задержки в фильтре на длительность импульсной характеристики T_m будет определять необходимую оперативную память для работы дробно-дифференцирующего фильтра ($M = T_m/\Delta T$, где ΔT — шаг дискретизации), которая существенно меньше оперативной памяти, необходимой для спектрального анализа.

III. Заключение

Для космического объекта диаметром ~100 м при периоде вращения ~10 мин ширина спектра скоростей составит величину ~ 1 м/с, что соответствует ширине доплеровского спектра в X-диапазоне ~50 Гц. Для высокого разрешения по скорости (~0,01 м/с), расчет центра тяжести спектра по соотношению (1) потребует порядка ~10^8 операций умножения, в то время как использование дробного дифференцирования позволяет получить оценку с той же точностью с задержкой по времени на величину T_m ~10 мкс (для фильтра порядка M = 100) по окончании времени наблюдения.

Предложенный алгоритм значительно проще и экономней классического, использующего спектральный анализ доплеровского сигнала.

Работа выполнена при поддержке Российского фонда фундаментальных исследований (грант № 13-01-97041-р_поволжье_а).

IV. References

[1] Gonorovskij I.S. *Radiotehnicheskie cepi i signaly* [Radio technical circuits and signals]. Moscow, Radio i svjaz', 1986. 512 p.

[2] Frenks L. *Teorija signalov: Perev. s angl., pod red. D.E. Vakmana* [Signals Theory: transl. from engl., red. D.E. Vakman]. Moscow, Sov. Radio, 1974, 344 p.

[3] Zaharchenko V.D. Ocenka srednej chastity doplerovskih signalov metodom drobnogo differencirovanija [Estimation of average frequency of Doppler signals by fractional differentiation method*]. Fizika volnovyh processov i radiotehnicheskie sistemy*, 1999, vol. 2, No 3-4, pp. 39-41.

[4] Samko S.G., Kilbas A.A., Marichev O.I. *Integraly i proizvodnye drobnogo porjadka I nekotorye ih prilogenija* [Integrals and fractional order derivative and some applications]. Minsk, Nauka I tehnika, 1987. 688 p.

 ISBN: 978-966-335-395-1. IEEE Catalog Number: CFP13788